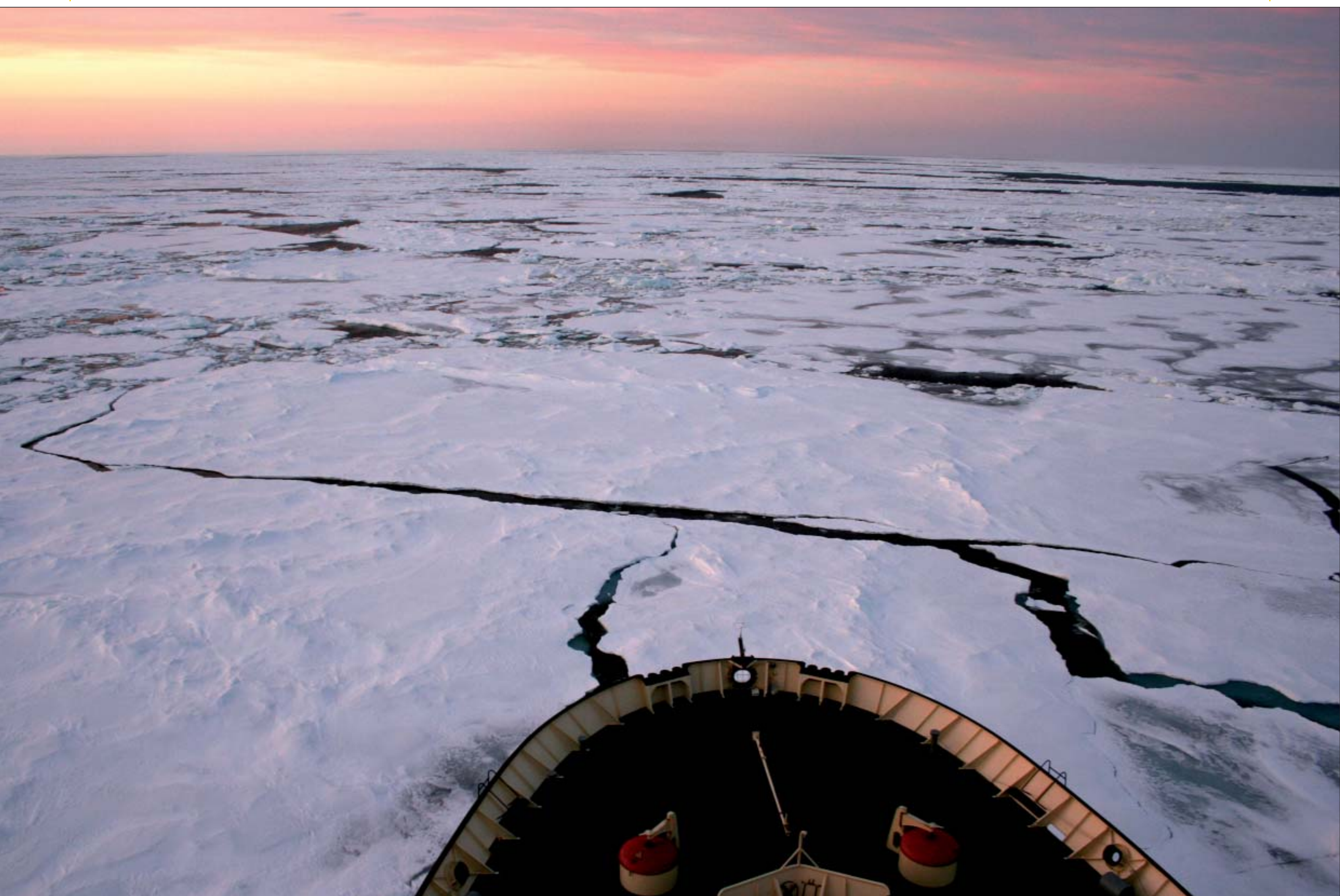
Global opvarmning
- feedbacks og polar forstærkning



Morgenstemning i Laptev-havet, september 2005. Bemærk den skarpe farvekontrast mellem is og hav. Sprækkerne i isen, smeltevandet oven på isen og det lave skydække betyder, at det er svært at beregne, hvor stor en del af solstrålingen der vil blive reflekteret. Sådanne situationer bidrager til at komplicere modellering af klimaet. (Foto: Peter L. Langen)

Af Peter L. Langen og Sune Olander Rasmussen, Center for Is og Klima ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet

Jordens globale middeltemperatur er bestemt af energistrømme mellem Jorden og verdensrummet, mens kontrasten mellem varme og kolde områder er bestemt af energiudvekslinger inden for klimasystemet, fx mellem høje og lave breddegrader, og mellem land, hav og atmosfæren. Således vil ændringer i Jordens samlede evne til at absorbere energi fra solen eller udstråle den igen kunne føre til klimaændringer, men om det fører til geografisk jævn opvarming (eller afkøling) afhænger af, hvordan de interne energistrømme reagerer på ændringen.

I denne artikel vil vi bl.a. beskrive, hvordan temperaturændringer typisk vil være mest udtalt på høje breddegrader. Et fænomen, der i klimafagsprog kaldes polar forstærkning (på engelsk *polar amplification*).

Energibalance og drivhuseffekt

Jordens energiudveksling med verdensrummet sker udelukkende via elektromagnetisk stråling: Udefra kommer fortrinsvis synligt lys fra solen, hvoraf noget reflekteres tilbage til rummet og noget absorberes i jordsystemet, og ud strømmer fortrinsvis infrarød stråling. Såvel Jordens som solens udstråling skyldes, at ethvert legeme udsender stråling – såkaldt Planck-stråling – med en bølgelængdefordeling (et spektrum) og en intensitet, der bestemmes af temperaturen af legemet. Solens høje overfladetemperatur (ca. 6.000 K) gør, at en stor del af udstrålingen sker i bølgelængdeområdet for synligt lys, mens Jordens meget lavere temperatur (ca. 300 K) medfører, at størstedelen af strålingen er i den infrarøde del at spektret.

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.COM

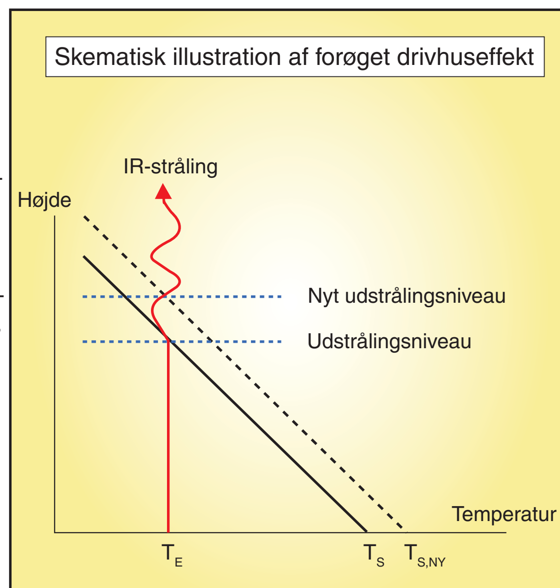
På trods af at den stråling, som solen og Jorden udsender, således har forskellige karakteristika, er det altså grundlæggende den samme proces, der er tale om. Den samlede energi, som udstråles af et perfekt sort legeme (dvs. et legeme, der ikke reflekterer stråling), kan beregnes med den såkaldte Stefan-Boltzmanns lov og er proportional med dets temperatur i fjerde potens:

$$\boldsymbol{E = \sigma T^4} \qquad (1)$$

Strålingsmængden $\boldsymbol{E}$ angives som en energifluxtæthed og måles i Joule per sekund per kvadratmeter (W/m^2), og Stefan-Boltzmanns konstant $\boldsymbol{\sigma}$ er 5,67 10^{-8} $W/(m^2K^4)$. Når man kender solens temperatur og den brøkdel af solens udstrålede energi, der absorberes af Jorden, kan man således regne ud, hvad Jordens temperatur skal være for at balancere indkommende og udgående stråling. En sådan beregning giver 255 K (ca. -18 °C), en størrelse vi kalder Jordens effektive udstrålingstemperatur $\boldsymbol{T_E}$, og som er markant koldere end den målte middeltemperatur på 288 K. Forskellen på 33 K skyldes drivhuseffekten og svarer til forskellen mellem Jorden, som vi kender den, og en kold og isfyldt planet.

Vores beregning af den effektive udstrålingstemperatur er et glimrende udgangspunkt for at forstå drivhuseffekten. En række af de gasser, der udgør vores atmosfære, fx vanddamp, kuldioxid og metan, har den egenskab, at de er i stand til at absorbere den infrarøde stråling, der udsendes fra Jordens overflade. Når disse molekyler skal af med den absorberede energi, udstråles den igen som Planck-stråling i alle retninger, dvs. at halvdelen udsendes i retning mod jordoverfladen. Skyer har også denne egenskab og medvirker derfor også til drivhuseffekten. Resultatet er, at set fra rummet, udsendes Jordens udstrålede energi ikke fra overfladen, men fra et lag af drivhusgasser oppe i atmosfæren. Da atmosfærens temperatur falder med højden, vil drivhusgasserne, som har samme temperatur som den omgivende luft, udstråle med en lavere temperatur end overfladens.

Drivhuseffekten betyder således, at den stråling, jordatmosfære-systemet skal udsende for at balancere den indkommende solstråling, udsendes fra højere og koldere lag i atmosfæren, hvilket tillader jordoverfladen at være varmere, end den ellers ville have været. Gennemsnitligt er dette niveau netop det, hvor temperaturen er den effektive udstrålingstemperatur på 255 K. Derefter kan man regne nedad fra dette niveau – med en temperaturstigning på så og så mange grader per meter man bevæger sig nedad – og bestemme, hvad temperaturen vil være ved overfladen. Hvis man forøger mængden af drivhusgasser i atmosfæren, vil niveauet, hvorfra udstrålingen effektivt finder sted, ligge højere, og udstrålingen vil således i en periode ske fra en lavere temperatur.



Skematisk illustration af forøget drivhuseffekt. Udstrålingsniveauet har, når indkommende og udgående stråling er i balance, netop udstrålingstemperaturen, T_E. Når man følger temperaturprofilet nedad, fås overfladetemperaturen, T_S. Forøges mængden af drivhusgasser, således at atmosfæren bliver "tykkere" (set fra et infrarødt synspunkt), hæves udstrålingsniveauet, hvorved atmosfæren udsender stråling fra et koldere lag. Da der således udsendes stråling med en lavere intensitet, er systemet ikke længere i balance, og det vil varme op, til det nye udstrålingsniveau når T_E. Overfladetemperaturen stiger derved til $T_{S,NY}$. (Grafik: UVH modificeret efter P. Langen)

Dette medfører, at mængden af udgående infrarød stråling mindskes, og systemet vil have et energioverskud, da den indkommende mængde ikke ændres. Dette giver en opvarmning, og på et tidspunkt vil opvarmingen være netop så stor, at temperaturen i udstrålingsniveauet igen har nået udstrålingstemperaturen, $\boldsymbol{T_E}$. Hvis atmosfærens temperaturprofil er uændret, vil man ved overfladen, som nu ligger i en større afstand fra udstrålingsniveauet, komme frem til en forhøjet temperatur. Dette er den opvarmning, man efterhånden vil se ved overfladen som følge af en forøgelse af mængden af atmosfæriske drivhusgasser.

Klimafølsomhed og feedback-mekanismer

Denne opvarmning som svar på en ændring af drivhusgaskoncentrationen (eller en anden ændring af klimaets parametre) beskrives ved hjælp af et tal, man kalder klimafølsomheden. Lad os benytte eksemplet CO_2, en gasart man har studeret nøje de sidste 100 år. Både laboratorieforsøg og kvantemekaniske beregninger har gjort, at vi meget præcist kender CO_2-molekylets strålingsmæssige egenskaber (fx absorptionsspektret). Det kan derfor beregnes, hvor stor en ekstra energitilførsel til klimasystemet, der alt andet lige følger af en forøgelse af CO_2-koncentrationen. Denne ekstra energitilførsel vil vi i det følgende kalde forceringen, $\Delta\boldsymbol{F}$. Typisk bruges enheden W/m^2 for denne størrelse. I det særlige (og urealistiske!) tilfælde, hvor forceringen udelukkende medfører en jævn opvarmning af hele atmosfæren og overfladen (som skematiseret i det ovenstående), fås overfladetemperaturstigningen som

$$\Delta \boldsymbol{T_0} = \boldsymbol{\lambda_0} \Delta \boldsymbol{F} \qquad (2)$$

Følsomheden, $\boldsymbol{\lambda_0}$, er givet ved den såkaldte Stefan-Boltzmann-effekt: Når atmosfæren og overfladen varmer op, udstråles mere infrarød stråling, og ved en særlig temperaturstigning kompenserer den øgede udstråling netop for forceringen. Både simple beregninger og de mest komplekse klimamodeller er ret enige om, at denne følsomhed, $\boldsymbol{\lambda_0}$, er ca. 0,3 $K/(W/m^2)$.

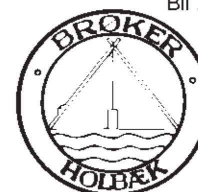
Denne udregning giver temperaturændringen i situationen, hvor klimaændringen

BRØNDBORINGSFIRMAET
BRØKER I.S.

Kontor og værksted: Telefon 59 44 04 06
Spånnebæk 7, 4300 Holbæk.
Fax 59 44 69 00

Thomas Brøker, privat 59 44 08 71
Bil 21 42 38 71

Henrik Brøker, privat 59 43 09 94
Bil 23 34 77 01



VORT SPECIALE ER:

BRØNDBORING, rotations- og tørboring.

MILJØBORING, hulsneglsboring med kerneprøveudtagning.

REGENERERING af boringer.

PRØVEPUMPNING af boringer og kildepladsundersøgelser med avanceret elektronisk udstyr og EDB-behandling.

Vi forhandler GRUNDFOS pumper og vort veludstyrede værksted renoverer Grundfos' vandværkspumper.

Vi leverer og monterer underjordiske GLASFIBERPUMPEBRØNDE af eget fabrikat med udstyr i rustfrit stål tilpasset de aktuelle dimensioner.

udelukkende er en jævn opvarming af atmosfæren og overfladen; der må ingen ændringer være i atmosfærens vanddampindhold og temperaturprofil, i is- og snedækket, i skydækket, i fordelingen mellem høje og lave skyer osv. Hvis sådanne parametre ændrer sig (og det gør de i den virkelige verden), vil den langbølgede udstråling, den absorberede kortbølgede indstråling eller begge dele ændres, og vi vil få yderligere forceringsled i ligningen:

$$\Delta T_S = \lambda_0(\Delta F + h_1\Delta T_S + h_2\Delta T_S + ...) \quad (3)$$

Her fortæller ***h***'erne, hvor meget ekstra forcering, der vil komme fra ændringerne i de forskellige parametre (skyer, vanddamp, is osv.) som følge af en temperaturændring på ΔT_S. Denne ekstra forcering kaldes en feedback: En ændring i temperaturen giver en ændring i en anden parameter, fx. vanddampindholdet, som vil ændre energibalancen og derved give en ekstra forcering og en ekstra temperaturændring.

Fortegnet af ***h***'erne afhænger af, om de enkelte mekanismer forstærker eller modvirker temperaturændringen, og kaldes positive feedbacks (forstærkende effekter, $h > 0$) eller negative feedbacks (modvirkende effekter, $h < 0$). Vi kan løse den ovenstående ligning for ΔT_S

$$\Delta T_S = \frac{\lambda_0}{1-\lambda_0(h_1+h_2+...)}\Delta F = \frac{\lambda_0}{1-(f_1+f_2+...)}\Delta F \quad (4)$$

Her kaldes ***f***'erne feedback-parametrene for de forskellige mekanismer og er produktet af følsomheden uden feedbacks, λ_0, og ***h***'erne. I forhold til ligning (2) ses det, at λ_0 er erstattet af $\lambda_0/(1-(f_1+f_2+...))$ og således indeholder de ændringer i klimafølsomheden, der hidrører fra de mange feedback-mekanismer. Bemærk igen fortegnene: Positive ***f***'er forøger følsomheden og omvendt.

Af de feedback-mekanismer, vi kender til, er de positive dominerende, og feedback-mekanismerne menes at mere end fordoble klimafølsomheden. To vigtige positive feedback-mekamismer er:

- Vanddampsfeedbacken. En opvarmning øger atmosfærens evne til at indeholde vanddamp. Den øgede mængde vanddamp er en kraftig drivhusgas og forstærker den oprindelige opvarmning.
- Is-albedo-feedbacken. Isdækket har stor indflydelse på Jordens albedo, dvs. den mængde af sollyset, der reflekteres til verdensrummet. Opvarmning vil lede til afsmeltning af is og sne, hvorved sne- eller isdækkede arealer med høj albedo erstattes af land- eller vand-arealer med lav albedo. Konsekvensen af den mindskede albedo er forøget absorption af sollys og derved en ydeligere opvarmning.

Det er ikke nemt at beregne, hvor stor en opvarmning der vil følge af den forøgede mængde af drivhusgasser, der er tilført atmosfæren siden begyndelsen af den industrielle revolution. En afgørende årsag til vanskelighederne er de små uskyldigt udseende ***f***'er. Som nævnt kan forceringen, ΔF, udregnes ret præcist, og nul-feedback-følsomheden, λ_0, er også godt bestemt. Der er derimod langt fra enighed om værdierne for ***f***'erne. Især de feedbacks, der har med skyer at gøre, volder hovedbrud. Skyer har både en kraftig drivhuseffekt (de absorberer og genudstråler langbølget stråling) og en kraftig albedoeffekt (de er hvide og reflekterer derfor solens kortbølgede stråling). Man har fastslået, at sidstnævnte effekt dominerer i nutidens klima, og skyer har derfor netto en afkølende effekt. Dog er man endnu ikke enig om, hvorvidt denne afkølende effekt vil styrkes eller svækkes i et varmere klima, og selv fortegnet på skyfeedbacken er således stort set ukendt.

Den globale middeltemperatur er ste-

Vores modeller er ikke tynde!

Grundvandsressourcerne skal kortlægges via gebyrkortlægningen. Denne kortlægning skal blandt andet danne baggrund for de kommunale indsatsplaner.

Vi hjælper med:
- Geofysisk kortlægning
- 3-D modeller
- Grundvandmodeller
- Kemisk kortlægning
- Potentialekort
- Afdækning af samspillet mellem grundvand og overfladevand



Læs mere på www.orbicon.dk

get i løbet af de sidste 100 år, og denne opvarmning skyldes primært forceringen, ΔF, fra den forøgede menneskeskabte drivhuseffekt. Her spiller CO_2 hovedrollen. Når man fra tid til anden hører om alternative forklaringer på opvarmningen, hvoraf nogle endda påstås at være mere sikre eller velforståede end effekten af CO_2, er det vigtigt at huske på, at de er underlagt de samme usikkerheder som drivhusmekanismen. Hvis en mekanisme er velforstået, vil man kunne udregne den tilsvarende forcering, ΔF, men når temperaturændringen skal bestemmes, er det de samme usikre f'er, der spiller ind. Uanset hvad forceringen skyldes, sker klimaændringer i samspil med nøjagtig de samme feedback-mekanismer, hvis forceringen vel at mærke geografisk er fordelt på nogenlunde samme måde. Med den sikkerhed, der er omkring værdien af ΔF fra CO_2, kan alternative teorier derfor næppe siges at være mere præcise eller bedre forstået. Dermed ikke sagt, at vores viden om klimasystemet er fuldstændig, eller at andre faktorer ikke kan spille ind, men hovedbidraget til vores usikkerhed skyldes snarere manglende kendskab til styrken af feedbackene end uenighed om styrken af forceringen.

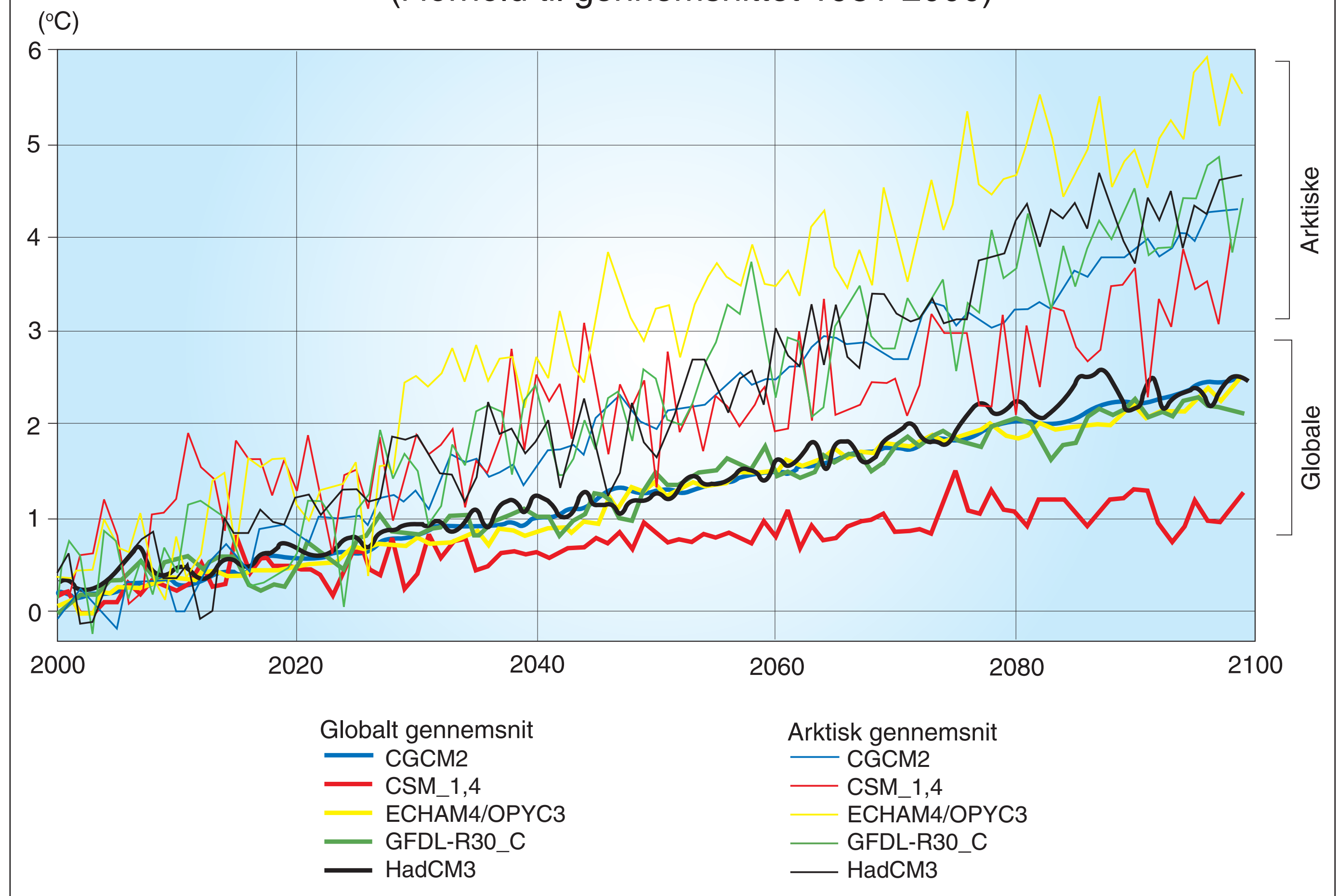
En grund til, at det er så svært at bestemme styrken af feedbackene, er, at de i sagens natur ikke kan studeres enkeltvis i den virkelige verden, hvor de jo alle virker samtidig. Derfor er klimamodeller helt afgørende for, at vi kan forstå systemet og udtale os om klimaet i fremtiden. I de mest komplekse modeller, vi har – de såkaldte generelle cirkulationsmodeller (GCMer) – bruges de fysiske ligninger for bl.a. bevarelse af impuls og energi sammen med en række teoretiske og observerede sammenhænge mellem atmosfæriske størrelser. Selvom de ikke indeholder alle feedbacks og forsimpler en række processer, er de nødvendige for at kunne studere vekselvirkningen mellem klimasystemets bestanddele.

Det er værd at understrege, at de ligninger, vi har talt om i det ovenstående, udelukkende er analytiske værktøjer til at forklare og diskutere globalt klima kvantitativt. De bruges ikke i klimamodellerne, når man laver forudsigelser af fremtidens klima. Feedbackparametre, følsomheder og forceringer afledes efterfølgende af resultaterne for at lette sammenligninger mellem resultater fra forskellige modeller.

Regionale effekter og polar forstærkning

De overvejelser, vi har gjort os i det ovenstående, har været for globale middelværdier, og vi har således talt om global temperatur, global forcering og globale feedbacks. Regionale forskelle er dog ofte mindst lige så vigtige: Hvor bliver det tørrere, vådere, varmere, koldere, mere stormfuldt osv.? Her kommer regionsspecifikke feedbacks ind i billedet, og man ser fx effekter af flytning af energi via hav- og atmosfærestrømme, forskelle i overfladealbedoen (is, sne, skov, ørken), forskelle i skydækket og forskelle i det vertikale atmosfæriske temperatur- og vanddampsprofil.

Igen er is-albedo-feedbacken et klassisk eksempel. Klart den største effekt af smeltningen af is eller sne føles netop i det nyligt blotlagte overfladeområde, hvor solens stråler nu fx kan ramme den mørke havoverflade frem for et næsten hvidt havisdække (se foto på første side i artiklen). Igen er



Temperaturudviklingen gennem det 21. århundrede ifølge 5 klimamodeller (generelle cirkulationsmodeller, GCMer) benyttet i Arctic Climate Impact Assessment-rapporten. De tykke streger er globalt midlede værdier, mens de tynde er arktiske middelværdier (60°-90°N). For alle modellerne ses det, at de forudser en væsentlig forstærket opvarmning på høje breddegrader. (Grafik: UVH modificeret efter ACIA-rapporten, http://www.acia.uaf.edu/)

sagerne dog ikke så ligetil, for det åbne hav vil levere langt større mængder vanddamp end et isdækket hav, og man vil typisk se en stigning i mængden af lave skyer. Den høje albedo fra is eller sne erstattes derfor til dels af skyer med høj albedo, som vil svække is-albedo-feedbacken. At isen forsvinder, påvirker også andet end albedoen: Sne og is har en varmeisolerende effekt, så havområder, der før var isdækkede, vil afgive store mængder varme til atmosfæren, efter isen er smeltet. Dette betyder, at tabet af is også har betydning om vinteren, hvor der i polare egne ellers er så mørkt, at albedo-effekten er irrelevant.

Det komplicerede samspil mellem hav, is, land og atmosfære giver anledning til særligt stor usikkerhed om nettostørrelsen af arktiske feedback-mekanismer, og netop her er klimamodellerne mest uenige om størrelsen af den fremtidige opvarming. To ting er modellerne dog alle enige om: 1) Det bliver varmere og 2) høje breddegrader, herunder specielt Arktis, vil opvarmes mere og hurtigere end resten af kloden. Denne effekt kaldes polar forstærkning.

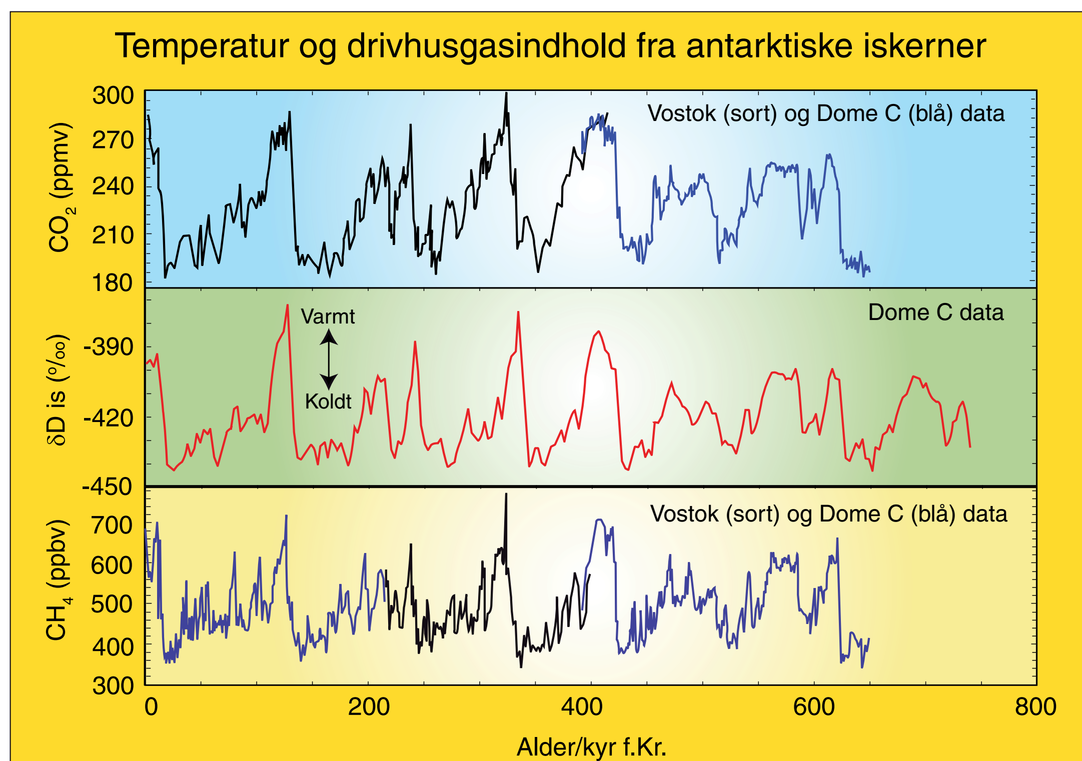
Med et forstærket signal på høje breddegrader er Arktis et oplagt sted at se efter de tidligste tegn på menneskeskabt opvarmning. Hvis kloden er ved at varme op, må det være særlig synligt i de arktiske områder, og dette har ført til et massivt fokus på Arktis. Observationerne bekræfter dette: Siden 1960'erne har Arktis oplevet en temperaturstigning, der overstiger middelværdien for den nordlige halvkugle. I takt med dette ses bl.a. en forlænget smeltesæson samt et fald i både havisudbredelse og -tykkelse.

I tillæg til lokale feedbacks som fx dem, der har med isdækket at gøre, findes der også mekanismer på global skala, der favoriserer opvarmning på høje breddegrader. Forsimplede klimamodelforsøg har vist, at hvis man, istedet for at forøge drivhusgasmængden jævnt over hele kloden, nøjes med at forcere på enten lave eller høje breddegrader, udviser systemet en interessant asymmetri. Forcering på høje breddegrader giver primært et "lokalt svar" (dvs. en opvarmning på høje breddegrader), mens en forcering på lave breddegrader resulterer i en opvarmning, der er af omtrent samme størrelse på både høje og lave breddegrader. Polar forstærkning opstår altså som summen af et lokalt svar på forceringen på høje breddegrader og et globalt svar på forceringen på lave breddegrader.

At forcering på lave breddegrader får globale konsekvenser, skyldes den transport af varme og vanddamp, der foregår i atmosfæren. Lad os vende tilbage diskussionen om energiudveksling med verdensrummet: Selvom Jorden globalt set er i strålingsbalance, således at ind- og udgående stråling er ens, gør dette sig ikke nødvendigvis gældende lokalt. På lave breddegrader modtages der på grund af den store solhøjde meget mere solenergi, end den lokale temperatur tillader at udstråle, og på samme måde udstråler høje breddegrader mere energi, end de modtager. Balancen opretholdes ved, at atmosfæren og havet transporterer energi mod polerne. I runde tal står atmosfæren for ca. 80 % af denne transport. Konsekvensen er, at temperaturforskellen mellem ækvator og poler er mindre, end den ville være, hvis alle områder på Jorden lokalt var i strålingsmæssig ligevægt. Den atmosfæriske transport varetages primært af de bølgeeffekter, der ved jordoverfladen manifesterer sig som passager af høj- og lavtryk. Disse bølger skyldes netop temperaturforskellen mellem ækvator og poler, og når denne vokser, forøges energitransporten, og systemet kan på denne måde stabilisere sig selv. Ved en opvarmning stiger atmosfærens indhold af vanddamp, og bølgerne vil transportere mere vanddamp mod polerne. Dette udmønter sig i en ekstra opvarming af atmosfæren på høje breddegrader, som forplanter sig til overfladen. På denne måde fører en forcering på lave breddegrader til en opvarmning på høje breddegrader.

Hidtil har vi talt om polar forstærkning i forbindelse med opvarmning, men begrebet dækker også den modsatte effekt, nemlig at en klimaafkøling også er mest udtalt på høje breddegrader. Altså vil små skift mellem koldt og varmt i tropiske egne kunne opleves som langt større skift ved polerne. På samme måde som man i ingeniørvidenskaben tit er interesseret i egensvingningerne for et system, som fx en bjælke, en møllevinge, et højhus eller en bro, så har klimasystemet også en række egensvingninger. Den svingning, der er lettest at anslå (dvs. sætte i gang), har ved modelforsøg vist sig netop at være svingningen, hvor høje og lave breddegrader svinger i takt, men med størst amplitude på høje breddegrader. Polar forstærkning kan således betragtes som en anslåelse af dette for klimasystemet "foretrukne" svar.

Spørgsmålet om temperaturforskellen mellem ækvator og pol er også interessant i en geologisk sammenhæng. Fx var Eocæntiden (for ca. 55 millioner år siden) karakteriseret ved et varmt klima med meget mindre temperaturforskelle end i dag. I runde tal er nutidens middeltemperatur 15 °C med en



Data fra to antarktiske iskerner, der viser CO_2-koncentrationen, δ-Deuterium (der er et indirekte mål for temperatur) og CH_4- koncentrationen gennem de seneste 650.000 år. De tre parametre svinger stort set i takt og antyder, hvordan drivhusgasserne fungerer som en del af feedback-systemet, der forstærker temperaturændringer. (Grafik: UVH modificeret efter www.pages.unibe.ch)

forskel i middeltemperatur på 40 °C fra de koldeste til de varmeste områder. Til sammenligning var Eocæns middeltemperatur 20 °C, men med en forskel mellem ekstremerne på kun 20 °C. Dette har klimamodellerne ret store problemer med at genskabe, selvom de relevante grænsebetingelser benyttes, dvs. ændret geografi, solindstråling og drivhusgasniveau. Man kan godt få klimaet varmt nok, men de meget varme polare egne kan man ikke genskabe. Det tyder på, at der er særlige feedbacks, som gør sig gældende ved høje temperaturer, og som simpelthen ikke repræsenteres af modellerne, som de ser ud i dag. Med sortseerbriller på, kan disse mangler ved modellerne betyde, at der er overraskelser i vente med endnu kraftigere polar forstærkning, når klimaet for alvor begynder at varme op.

Afsluttende bemærkninger

Når man, som med Eocæn-eksemplet, drager paralleller til tidligere tiders klima, skal man være forsigtig. I det ovenstående brugte vi Eocæn som en slags test af, om klimamodellerne korrekt kan simulere et meget varmere klima. Eksemplet kan ikke bruges til at sige, at når klimaet "af sig selv" kunne varme så meget op som under Eocæn, så behøver den igangværende opvarmning ikke være menneskeskabt. Forudsætningerne er ganske enkelt ikke de samme: Både kontinenternes beliggenhed, solindstrålingens fordeling hen over Jorden og årstiderne og atmosfærens sammensætning var anderledes.

Benytter man tidligere tiders klima-begivenheder som analogi til mulige fremtidige klimatiske forhold, skal man også være opmærksom på, om begivenheden rent faktisk både er global og samtidig: Det er meget nemmere at flytte energi rundt i systemet og varme op nogle steder og køle ned andre steder, end det er at få samme fortegn på ændringen globalt. Således er det ikke ligetil at benytte middelaldervarmen, hvor vikingerne koloniserede Grønland, eller den såkaldte "lille istid", hvor svenskerne gik over isen, i sammenligninger med nutidens globale forandringer, da disse klima-begivenheder med stor sandsynlighed kun var regionale.

Vi har gennem denne artikel talt om drivhusgasserne, herunder specielt CO_2, som en forcerende faktor i klimasystemet, men på længere tidsskalaer bør drivhusgasserne snarere opfattes som en del af feedback-systemet. Der er nemlig en lang række temperaturafhængige processer – kemiske, fysiske og biologiske – der er styrende for fx CO_2- og metanindholdet. Når klimaet er varmere, er der en tendens til, at koncentrationen øges og omvendt. Således viser antarktiske iskerneboringer, at CO_2- og metanindholdet og temperaturen næsten svinger i takt gennem de seneste istider. Dette skal hverken forstås sådan, at drivhusgasserne er årsagen til istidssvingningerne, eller at de blot passivt følger temperaturændringerne. De er del af en positiv feedback-løkke, hvor temperaturændringer (sandsynligvis sat igang af ændringer i solindstrålingen) ændrer drivhusgasniveauet, som så igen forstærker temperaturændringerne.

Det, vi oplever nu, er en fundamentalt anden situation, hvor CO_2-niveauet øges som følge af afbrænding af fossile kulstofreserver. Temperaturen vil formentlig stige som følge heraf, og ovenstående feedback vil måske med tiden øge opvarmningen yderligere. Selvom drivhusgassernes effekt derfor rent fysisk er den samme i fortidens og fremtidens klima, kan man således ikke direkte bruge fortidens klimaændringer, som fx afledes fra målinger på iskerner, som analogi til fremtidens klimatiske udvikling.

Naturlig variabilitet

"Min onkel Arne røg 60 cigaretter og drak en flaske whisky om dagen, og han levede til han blev 108 år. Derfor kan tobak og alkohol ikke være farligt." Jo det kan, for der er også naturlig variabilitet oven på det egentlige signal. Hvis du havde et helt alfabet af onkler, der alle opførte sig som Arne, ville det nok vise sig, at onklerne Bjarne til Åge ikke levede lige så længe. På samme måde er der naturlig variabilitet i klimaet, og det menneskeskabte signal træder måske ikke klart frem med det samme. Som tiden går og forceringen bliver større, vil signalet dog blive mere og mere tydeligt i forhold til variabiliteten.

Iskernerne kan dog bruges til bedre at forstå klimasystemets bestanddele.

Sammen med observationer er klimamodellerne, på trods af de ufuldkommenheder, de stadig besidder, således et af de vigtigste redskaber til at forstå klimaet og forudsige konsekvenserne af menneskeskabte ændringer i såvel atmosfærens sammensætning som i jordoverfladens udseende. Vi har intet andet laboratorium, og feedbackene kan ikke udledes udelukkende af observationer. Den polare forstærkning er et glimrende eksempel herpå, i og med at den fremkommer som summen af en lang række af både lokale og globale effekter. Usikkerhederne i modellernes resultater stammer primært fra feedbackene frem for fra forceringen, og således er studier af de enkelte feedbacks herunder (måske især) skyernes rolle, vigtige for at øge forståelsen og forbedre forudsigelserne, uanset om CO_2 er den vigtigste forcering eller ej.

Vindere af geokonkurrencen

Af geolog Ulla V. Hjuler, GeologiskNyt

I sidste nummer af GeologiskNyt stillede vi 20 spørgsmål til geoprofessoren. Vi har nu fundet de 5 heldige vindere, der havde svaret rigtigt på alle spørgsmålene.

Nedenfor bringes de rigtige svar:

(1) 150 m^3
(2) Aminobacter
(3) De krystalliserer kubisk
(4) 65 m
(5) Søren Bom Nielsen
(6) Sillimanit, andalusit, kyanit (Al_2SiO_5)
(7) Møns Klint
(8) The Day after Tomorrow
(9) Kridt
(10) Fx Siri, Gorm, Syd Arne, Dan
(11) Nej, pighuder (Echinodermata)
(12) Calcit
(13) Sumatra
(14) Højt SiO_2-indhold
(15) Ja, i Sarfartoq-området
(16) Fx Møns Klint, Gram Lergrav, Nye Kløv
(17) Dinosarerne
(18) Pangea
(19) Meteoritnedslag
(20) Weichsel

De 5 vindere er:

- Mogens K. Hansen, Svenborg
- Karl A. Jørgensen, p.t. Benin
- Eva Fakstorp, Charlottenlund
- Ole Dahl, Grønland
- Gorm Nielsen, Nykøbing F

Alle vinderne vil modtage deres præmier i løbet af maj måned. Tak til alle der sendte ind besvarelser.